

Herstellen von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) über ein Silizium-Hochtemperatur-Fusionsbonden von Scheiben

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von MEMS, bei denen der Sensor und die sensorsignal-verarbeitende Elektronik monolithisch integriert sind.

MEMS werden seit Jahren auf der Basis von Silizium-Technologien hergestellt. Als MEMS wurden ursprünglich Sensoren bezeichnet, die sich aus einem mikromechanischen Teil und einem mikroelektronischen Teil zusammensetzen. Die Herstellungsverfahren können nach ihrem mikromechanischen Aufbau im wesentlichen in zwei Kategorien eingeteilt werden. Einerseits wird eine Siliziumscheibe in ihrer ganzen vertikalen Dimension, d.h. **in die Tiefe** hinein bearbeitet, um Strukturen zur Detektion mechanischer Größen, wie z.B. Druck und Beschleunigung herzustellen (bulk-micromachining technologies). Andererseits werden solche Strukturen nur **an der Oberfläche** der Siliziumscheibe erzeugt (surface-micromachining technologies).

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren handelt es sich um eine Verknüpfung beider Technologiearten.

Während anfänglich die Sensoren zur Detektion mechanischer Größen und die signalverarbeitende Elektronik (z.B. digitale integrierte Schaltkreise) getrennt waren, zwingt der technische Fortschritt heute zur monolithischen Integration beider. Die Integration von mikromechanischen Sensoren und elektronischen Schaltungen auf einem Chip stellt hohe Anforderungen an die Herstellungstechnologie, da die Herstellungsprozesse der Sensoren häufig nicht kompatibel zu denen der hochintegrierten CMOS-Technologien mit z.B. Strukturgrößen $\leq 1\mu\text{m}$ sind. Kompromisse hinsichtlich erreichbarer Daten (Empfindlichkeit, Genauigkeit, Messbereich), Integrationsgrad (Strukturgrößen), Zuverlässigkeit und Kosten stehen an.

Die für den Teil der mikromechanischen Sensoren der MEMS bekannte spezifische Verfahrensweise besteht in der Strukturierung eines Kavitätenkörpers, zumeist einer Kavitätenscheibe (Kavitäten-Wafer), durch halbleiterübliche Prozessschritte wie Oxidation, Fotolithografie und nasschemisches Ätzen. Dadurch werden Vertiefungen in das Silizium geätzt, die später durch Überdeckung zu Hohlräumen (Kavitäten) werden über denen sich die Silizium-Membran oder andere sich unter mechanischen Belastungen bewegende Sensorelemente befinden. Nach Strukturierung des Kavitäten-Körpers wird dieser mit der Seite, welche die Einsenkungen besitzt, durch ein Scheibenbondverfahren mit einer Abdeckscheibe (top-cap-wafer) untrennbar verbunden, so dass aus den Vertiefungen Hohlräume entstehen. Anschließend wird der

so entstandene Scheibenstapel durch Siliziumschleif- und Polierprozesse, wie sie standardmäßig in der Halbleiterherstellung verwendet werden, bearbeitet, so dass die Abdeckscheibe stark abgedünnt wird.

DE-A 199 27 970 und **DE-A 199 27 971** beschreiben, dass zur Erzeugung der Kavitäten eine Zwischenschicht dient, die auf eine der beiden Halbleiterscheiben aufgebracht wird. In dieser Zwischenschicht werden Ausnehmungen (Einsenkungen) erzeugt. Über die Zwischenschicht auf der einen Halbleiterscheibe wird diese mit einer zweiten Halbleiterscheibe verbunden. Danach wird eine der beiden Halbleiterscheiben bis auf die der Membran entsprechenden Dicke abgedünnt, womit über der Kavität eine Membran ausgebildet wird. Da in diesen Fällen die elektronischen Strukturen im homogen dotierten Scheibenmaterial erzeugt werden, die Scheiben mittels einer auf eine Halbleiterscheibe aufgetragenen Zwischenschicht verbunden werden, handelt es sich offenbar nicht um Hochtemperatur-Fusionsbonden. Da ferner die Herstellung von Drucksensoren beschrieben ist, kann davon ausgegangen werden, dass CMOS-spezifische Verfahren für hohe Integrationsdichten und hohe Werte der Zuverlässigkeit und Ausbeute nicht vorteilhaft eingesetzt werden können. Defekte, die im homogenen Scheibenmaterial (Czochralski-Silizium) vorhanden sind, verhindern z.B. die Herstellung eines qualitativ hochwertigen Gateoxids.

Bekannt ist andererseits aus der **US-A 5, 295,395** im Zusammenhang mit der Beschreibung der Herstellung eines Membrandrucksensors eine erste Halbleiterscheibe mit einer Epitaxieschicht entgegengesetzter Dotierung, über welche diese mit einer zweiten Halbleiterscheibe durch Fusionsbonden verbunden wird, wonach eine Abtragung der ersten Halbleiterscheibe bis auf die Epitaxieschicht so erfolgt, dass die Membran durch die Epitaxieschicht gebildet wird. Ein Hinweis auf die nachträgliche Erzeugung von signalverarbeitenden elektronischen Schaltungen auf der Oberfläche der Epitaxieschicht ist nicht gegeben. Vielmehr muss man aus der Patentschrift entnehmen, dass nach dem Scheibenbünden kein weiterer Hochtemperaturschritt mehr angebracht ist, weil zur Vermeidung von Verformungen der Scheibenbereiche der Deckscheibe über den Einsenkungen beim Scheibenverbinden eine Füllsubstanz in den Einsenkungen nötig war, die später wieder entfernt wurde.

In den bekannten Veröffentlichungen gibt es keine Hinweise darauf, dass der elektronische Teil der Sensoren und die signalverarbeitende Elektronik in Form von hochintegrierten Schaltkreisen monolithisch integriert mit den selben Herstellungsverfahren ausgebildet werden.

Aufgabe der Erfindung ist die Steigerung der Empfindlichkeit und der Zuverlässigkeit sowie die Senkung der Herstellung- und Anwendungskosten von MEMS mit integrierter Auswertelektronik. Ausserdem soll eine Verbesserung des Herstellungsverfahrens erreicht werden, so dass der sensorspezifische Teil und der Teil der auf CMOS-Technologie beruhende Teil der Auswertelektronik der MEMS mit einer vereinheitlichten Technologie monolithisch hergestellt werden können.

Die Aufgabe wird mit den im Anspruch 1 oder 10 beschriebenen Schritten gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind den Unteransprüchen zu entnehmen. Das Verfahrensergebnis des Sensors umschreibt Anspruch 20.

Durch die Spezifikationen des Scheibenmaterials der Deckscheibe und speziell der von dieser getragenen Epitaxieschicht (Dotierstoff, Schichtwiderstand, Defektstruktur), welche im speziellen Fall die Dicke der gewünschten Membran haben kann, sowie Anwendung des Hochtemperatur-Fusionsbondens zum Verbinden zweier Halbleiterscheiben können die Anforderungen für die Anwendung einer CMOS-Technologie erfüllt werden.

Es liegt im Rahmen der Erfindung, dass in die Epitaxieschicht der Deckscheibe bereits vor dem Scheibenbonden elektronische Strukturen eingebracht werden (Anspruch 2), die so ausgelegt sind, dass sie von den nachfolgenden Hochtemperaturbehandlungen nicht mehr wesentlich verändert werden oder mit diesen fertig präpariert werden, was zu einer Verdichtung der elektronischen Strukturen oder/und auch zu einer Datenverbesserung beitragen kann.

... ..

Die Erfindung wird anhand von Ausführungsbeispielen erläutert und ergänzt, wobei darauf hingewiesen wird, daß es sich bei der folgenden Darstellung um die Beschreibung von bevorzugten Beispielen der Erfindung handelt.

Figur 1 ist ein Beispiel eines Scheibenverbundes aus einem Bulk-Wafer 2 und einem EPI-Wafer 1, die über ein High-Temperature Silicon-Fusing-Bonding miteinander verbunden sind, zur Bildung eines Scheibenverbundes oder -verbands.

Figur 2 ist ein Beispiel eines Absolutdruck-Sensors, unter Verwendung des Scheibenverbands der Figur 1.

Figur 1 zeigt eine Zusammenfügung von zwei Halbleiterscheiben, hier Silizium-Scheiben, die nicht gleich ausgestaltet sind. Sie dienen dem Verfahren zur Herstellung von mikroelektromechanischen Sensoren, wobei die Sensoren und die Signalverarbeitungs-Elektronik monolithisch integriert ausgeführt sind.

Die erste Scheibe 2 ist als Siliziumscheibe ausgebildet. Sie trägt eine Kavität 2a. Es sind auch mehrere Kavitäten möglich, bloß zur Erläuterung eine Kavität hier heraus vergrößert, aus einem größeren Wafer. Der EPI-Wafer trägt ein Substrat aus Silizium und eine Epitaxieschicht, die mit 3 benannt ist. Diese beiden Wafer 1 und 2 werden durch Hochtemperatur-Fusions-Boden über die Epitaxieschicht 3, bzw. deren Oberfläche fest miteinander verbunden. Die Einsenkung oder Kavität 2a wird abgedeckt und bildet einen geschlossenen Hohlraum.

Der Scheibenverband aus beiden Scheiben ist in Figur 2 weiter prozessiert worden. Der Scheibenverband wurde von der zweiten Scheibe 1 her bis zur Epitaxieschicht 3 ausgedünnt, bzw. abgetragen. Der Rest 3a (Restdicke) der verbleibenden Epitaxieschicht 3 ist in Figur 2 ersichtlich und deckt den Hohlraum 2a zur Bildung einer Kavität 2a (geschlossener Hohlraum) ab.

Die Ausdünnung erfolgte bis zu einer Dicke herab, die einer Membrandicke entspricht, um durch mechanische Verformung dieser Membran Messsignale aufnehmen zu können. Die Membrandicke der verbliebenen Membran 3a entspricht dem mikromechanischen Teil eines Sensors 5, der in Figur 2 schematisch als Drucksensor eingezeichnet ist. Die Drucksensoren 5 liegen oberhalb der Kavität 2a (sind zur Kavität positioniert). Die Ausdünnung kann aber auch auf eine andere Dicke erfolgen, entsprechend einer Dicke eines anderen auf mechanische Beanspruchung sensiblen Teils der Halbleiterscheibe, ohne gesonderte Darstellung.

Es schließt sich der Verfahrensschritt des Polierens an, der nicht gesondert dargestellt wird.

Nach dem Polierprozess wird eine zur Kavität positionierte elektronische Sensorstruktur 4 gemeinsam mit einer oder mehreren analogen und/oder einer oder mehreren digitalen Schaltungen auf der polierten Oberfläche über ein geeignetes Technologieverfahren erzeugt, im Beispiel ein CMOS-Technologieverfahren, zur Bildung des gesamten SOS-Wafers 6, der als Waferstapel benannt werden kann.

Die Sensoren 5 liegen in der verbliebenen EPI-Schicht 3a. Die Schaltungselemente 4 sind auf der verbliebenen EPI-Schicht und zeigen normale elektrische Eigenschaften.

Durch das Verfahren wird ein sicherer Gesamtprozess mit hoher Ausbeute erzielt, der für hochvolumige Produktionen geeignet ist.

Die Einbringung der Strukturen elektronischer Schaltungen in die Epitaxieschicht kann auch vor dem Verbindungsprozess der Scheiben (vor dem Bonden) nach Figur 1 erfolgen (nicht gesondert dargestellt).

Die EPI-Schicht 3 trägt dann bereits Strukturen der elektronischen Schaltungen auf der Seite, die nach der Verbindung der Kavität 2a zur Bildung des geschlossenen Hohlraums zugewandt ist (auch ohne gesonderte Darstellung). Die elektronischen Strukturen auf der, der Kavität 2a zugewandten Seite, können zumindest nach dem Bonden der Scheiben zur polierten Seite (bzw. Oberfläche) durchgreifen, z.B. elektrisch leitende Kanäle bilden, was nicht gesondert dargestellt ist.

Auf der der Kavität 2a zugewandten Seite meint, dass die zugehörigen elektronischen Strukturen zumindest teilweise in der Schicht bzw. Membran 3a liegen oder dort hineinreichen.

Die der Kavität 2a zugewandte Seite hat mit den besagten elektronischen Strukturen zumindest einen nicht dargestellten Sensor, der für die Analyse des einer Membran 3a in der Kavität 2a anliegenden Mediums geeignet ist.

Die allgemeinen Technologieverfahren, auf die Bezug genommen wurde, zur Schaffung der elektronischen Sensorstrukturen 4 brauchen nicht gesondert beschrieben zu werden, sondern sind als CMOS-Technologieverfahren allgemein bekannt.

Es wird ein Verfahren zur Herstellung eines mikroelektromechanischen Systems (Microelectromechanical System: MEMS) beschrieben, das monolithisch integriert den Sensor mit der sensorsignalverarbeitenden Elektronik auf CMOS-Technologie-Basis enthält. Durch Verbinden einer Vertiefungen besitzenden Halbleiterscheibe (2) mit einer eine Epitaxieschicht tragenden Scheibe über die Epitaxieschicht (3) mittels Hochtemperatur-Fusionsbonden zu einer Doppelscheibe und anschließenden einseitigen Abtrag der Doppelscheibe mit nachfolgender Politur bis zur Freilegung der Epitaxieschicht bei gleichzeitiger Schaffung einer Membran (3a), werden die Voraussetzungen geschaffen, um den elektronischen Teil (4) des Sensors (5) und die signalverarbeitende Elektronik mit CMOS-Technologieverfahren zu realisieren.

* * * * *

Ansprüche:

1. **Verfahren** zur Herstellung von mikroelektromechanischen Sensoren (MEMS), bei denen die Sensoren und die sensorsignalverarbeitende Elektronik monolithisch integriert ausgeführt sind,
 - (i) indem eine Kavitäten enthaltende erste Siliziumscheibe mit einer zweiten, eine Epitaxieschicht tragenden Deckscheibe durch Hochtemperatur-Fusionsbonden über die Epitaxieschicht fest miteinander verbunden werden,
 - (ii) wonach der Scheibenverband von der zweiten Scheibe her bis zur Epitaxieschicht, d.h. auf eine mit dem mikromechanischen Teil des Sensors entsprechende Membrandicke oder Dicke eines anderen auf mechanische Beanspruchung sensiblen Teils der Halbleiterscheibe abgetragen und dabei abschließend poliert wird,
 - (iii) wobei nach dem Polierprozess die zur Kavität (2a) positionierten elektronischen Sensorstrukturen gemeinsam mit den analogen oder/und digitalen Schaltungen auf der polierten Oberfläche mittels CMOS-Technologieverfahren erzeugt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass vor dem Scheibenverbindungsprozess in der Epitaxieschicht (3) bereits Strukturen elektronischer Schaltungen (4) auf der Seite vorhanden sind, die nach der Verbindung der Kavität zugewandt ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 und/oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die elektronischen Strukturen auf der der Kavität zugewandten Seite zumindest nach dem Scheibenbonden zur polierten Seite durchgreifen, z.B. elektrisch leitende Kanäle (4a) bilden.
4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 und/oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die auf der der Kavität (2a) zugewandten Seite vorhandenen elektronischen Strukturen spezielle Sensoren, insbesondere für die Analyse des an der Membran in der Kavität anliegenden Mediums enthalten.

- 10. Verfahren zur Herstellung eines mikroelektromechanischen Sensors oder solches Systems (MEMS), wobei zumindest ein Sensor und eine zugehörige sensorsignalverarbeitende Elektronik monolithisch integriert ausgeführt werden,**
- (i) indem eine zumindest eine Kavität (2a) enthaltende erste Scheibe (2) mit einer zweiten, eine Epitaxieschicht tragenden Scheibe (1) durch ein Hochtemperatur-Fusionsbonds über die Epitaxieschicht (3) miteinander verbunden werden, zur Bildung eines Verbands der Scheiben;
 - (ii) der Verband der Scheiben von der zweiten Scheibe her bis zur Epitaxieschicht (3) abgetragen und dabei (abschließend) poliert wird;
 - (iii) nach dem Polierprozess zumindest eine zur Kavität (2a) positionierte Sensorstruktur (5) und zumindest eine analoge oder/und digitale Schaltung (4) von der polierten Oberfläche aus über ein CMOS-Technologieverfahren erzeugt werden.
11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei das Abtragen auf eine dem mikromechanischen Teil des Sensors (5) entsprechende Membrandicke (3a) oder eine Dicke eines anderen, auf mechanische Beanspruchung sensiblen oder ansprechenden Teils der Halbleiterscheibe erfolgt.
12. Verfahren nach Anspruch 10, wobei vor dem Scheibenverbindungsprozess in der Epitaxieschicht (3) bereits Strukturen elektronischer Schaltungen (4) auf der oder ausgerichtet zu der Seite vorhanden sind, die nach der Verbindung der Scheiben (1,2) der Kavität zugewandt ist bzw. sie bedeckt.
13. Verfahren nach Anspruch 10 und/oder 12, wobei die elektronischen Strukturen auf der der Kavität zugewandten Seite zumindest nach dem Scheibenbonds zur polierten Seite durchgreifen, insbesondere elektrisch leitende Kanäle (4a) bilden.
14. Verfahren nach Anspruch 10, wobei die auf der, der Kavität (2a) zugewandten Seite vorhandenen elektronischen Strukturen Sensoren für die Analyse des an der Membran (3a) in der Kavität anliegenden Mediums enthalten.

...

- 20. Mikroelektromechanischer Sensor** oder solches Systems (MEMS), wobei zumindest ein Sensor (5) und eine zugehörige sensorsignal-verarbeitende Elektronik (4) monolithisch integriert ausgeführt sind,
- (i) indem eine zumindest eine Kavität enthaltende erste Scheibe (1) mit einer zweiten, eine Epitaxieschicht tragenden Scheibe (2) durch ein Hochtemperatur-Fusionsbonds über die Epitaxieschicht (3) miteinander verbunden ist, zur Bildung eines Verbands der Scheiben;
 - (ii) der Verband der Scheiben von der zweiten Scheibe her bis zur Epitaxieschicht (3) abgetragen und poliert ist;
 - (iii) eine zur Kavität (2a) positionierte mechanische Sensorstruktur (5) gemeinsam mit einer analogen oder/und digitalen Schaltung (4) auf der polierten Oberfläche oder zumindest teilweise in der abgetragenen Epitaxieschicht (3a) vorgesehen ist, erzeugt vor oder nach dem Polierprozess mittels eines monolithisch integrierenden Technologieverfahrens.
21. Sensor nach Anspruch 20, wobei das Abtragen bis zur Dicke einer Membran (3a) erfolgt.
22. Sensor nach Anspruch 20, wobei die Schaltungsstruktur (4) schon beim Bonden vorliegt, bzw. vorgelegen hat.
23. Sensor nach Anspruch 20, wobei das Technologieverfahren ein CMOS-Verfahren ist.

* * *